



G. Adžiev, A. Sedmak, T. Adžiev

ANALIZA OTPORNOSTI KA LOMU ZUT-A U ZAVARENIM SPOJEVIMA MIKROLEGIRANIH ČELIKA POVEĆANE ČVRSTOĆE

ANALYSIS OF THE HAZ FRACTURE RESISTANCE OF HSLA STEEL WELDMENTS

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.05:539.42
621.791.05:669.15-194

Rad primljen / Paper received:

April 2008.

Ključne reči: Energija udara, ZUT, prslina, stabilan rast prsline, lom.

Izvod

Ispitivane su karakteristike otpornosti ka lomu u ZUT zavarenog spoja mikrolegiranog čelika povećane čvrstoće koji se koristi za izradu posuda pod pritiskom. S obzirom na namenu zavareni spoj treba da ima veliku otpornost ka pojavi i rastu prsline. Analiza je obuhvatila udarnu žilavost uzoraka simuliranih mikrostrukture koje su tipične za ZUT, žilavost loma nestandardnih uzoraka sa simuliranim mikrostrukturama i konačno standardne zavarene SENB uzorke. Analiza je pokazala da tip prsline (erozimatna i zamorna) na početak stabilnog rasta prsline ima veći uticaj kod duktilnijih mikrostrukture, a manji ili skoro nikakav kod krtijih. Takođe, komparativna analiza simuliranih uzoraka i zavarenih uzoraka pokazala je uticaj odnosa i veličine mikrostrukturnih regiona u ZUT-u na rast prsline t.j. uticaj mismecha na otpornost ka lomu.

* Rad je izlagan na Savetovanju sa međunarodnim učešćem "ZAVARIVANJE 2008" - Subotica

Adresa autora / Author's address:

Gjorgji Adžiev, Todor Adžiev,
Mašinski fakultet, Univerzitet "Sv. Kiril i Metodij",
Karpoš II bb. Skopje, Makedonija.

Aleksandar Sedmak,

Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu,
Kraljice Marije br. 16, Beograd, Srbija.

Keywords: Impact energy, HAZ, crack, stabile crack growth, fracture.

Abstract

The HAZ fracture behavior of the weldments of HSLA steel for pressure vessels has been investigated. Having in mind the purpose of such structure, the welded joint should poses sufficient resistance towards crack occurrence as well its propagation. The analysis encompassed impact toughness testing of Charpy specimens and fracture toughness determination of SENB specimens of base metal and simulated microstructures of HAZ, and finally fracture toughness testing of welded specimens with crack located in the very narrow HAZ regions. The analysis revealed the effect of the crack tip (electro eroded or fatigued) on the onset of the stabile crack growth for the different microstructures. The comparative analysis between the testings showed the influence of the mismatch towards the fracture behavior of real welded joint in respect of simulated microstructures.

UVOD

Većina opštih postrojenja koje se koriste u transportnoj industriji, elektroprivredi, postrojenja za skladištenje tečnosti i gasova, naftene platforme itd., u okviru svoje konstrukcije uključuju zavarene konstrukcije t.j. zavarene spojeve, koji su veoma osetljiv deo svake konstrukcije s obzirom da se zavareni spojevi izrađuju i rade u kompleksnim metalurškim i naponskim okolnostima. Početkom stoleća, dizajn konstrukcija je bio baziran na čvrstoći i duktilnosti materijala.

Razvoj mikrolegiranih i niskolegiranih čelika povećane čvrstoće, zatim čelika za poboljšanje, kako i novije tehnologije za izradu, promenili su pristup dizajnera koji su pečeli da projektuju na osnovu granice tečenja i žilavosti, umesto zatezne čvrstoće [1].

U ovom radu je analizirana otpornost ka lomu tipičnih mikrostrukture ZUT-a, i udarna i lomna, kako i ponašanje pri lomu zavarenih spojeva sa prslineom u ZUT, uzimajući u obzir tip prsline i uticaj susjednih mikrostrukturnih regiona na razvoj prsline.

Ispitivanje je vršeno na čeliku povišene čvrstoće, koji je ojačan preko mehanizma usitnjavanja zrna kao posledica mikrolegiranja, sa sledećim glavnim osobinama:

$R_{eH}=420$ MPa, $R_m=604$ MPa i $A_5=25\%$. Karakterističan je sadržaj ugljenika i titana, prikazan u tabeli 1, pri čemu je sadržaj ugljenika (0.2%) relativno visok za ovaj tip čelika, što pored titana, doprinosi povećanju čvrstoće, dok za usitnjavanje zrna i postizanje povoljnog odnosa između čvrstoće i plastičnosti glavni doprinos daje titan koji je dodat u količini od 0.12 %.

EKSPERIMENT

Za sprovedena ispitivanja izrađeni su sledeći tipovi uzoraka:

- standardni Šarpijevi uzorci sa V zarezom, za određivanje energije udara (žilavosti) simuliranih mikrostrukture ZUT-a



- b) nestandardni mali uzorci ($8 \times 14.8 \times 70$ mm) za određivanje žilavosti loma simuliranih mikrostruktura ZUT-a
- c) standardni SENB uzorci za određivanje žilavosti loma zavarenih spojeva sa prslinom u ZUT.

Simuliranje termičkih ciklusa zavarivanja sa kontrolisanim zagrevanjem i hlađenjem kao kod realnog procesa zavarivanja je sprovedeno na simulatoru tipa SMITWELD (Thermal cycle simulator) TCS 1405.

Urađena je dvojna simulacija nakon prvog ciklusa od 1350°C , na temperaturi od 780 i 960°C čime su pokrivena dva tipična mikrostrukturna regiona ZUT-a

višeslojnog zavarenog spoja gde su bile locirane prsline kod standardnih SENB uzoraka.

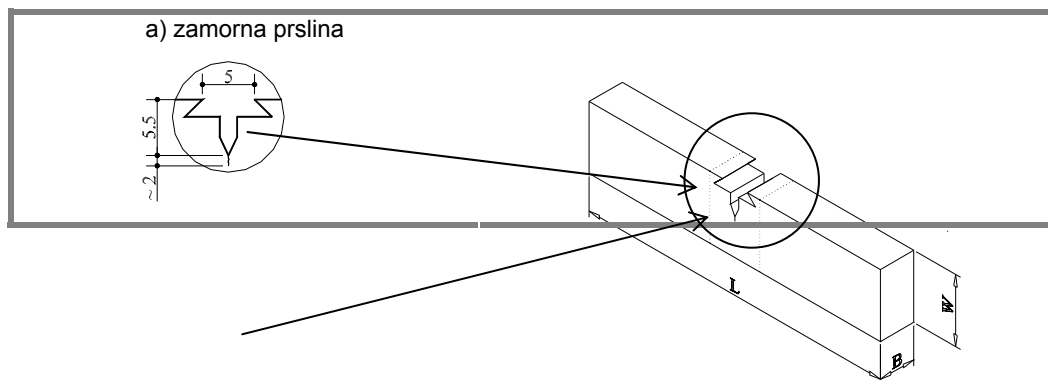
Simulirani uzorci su predgrevani na 200°C , zatim zagrevani do predviđene temperature i hlađeni sa $\Delta t_{8/5} \approx 15$ s za finožrnasti $1350/960^{\circ}\text{C}$ tj. gde je hlađeno sa $\Delta t_{8/5} \approx 60$ s za $1350/780^{\circ}\text{C}$ ZUT. Zavareni SENB ($24 \times 24 \times 110$ mm) uzorci su izrađeni prema slici 2, pri čemu su prsline izrađene elektroerozijom i locirane u finožrnasti ZUT i u grubožrnasti ZUT blizu linije stapanja.

Metod ispitivanja žilavosti loma, proračun i tumačenje dobijenih rezultata su u saglasnosti ASTM E 1820/ E 1152/ E 1290/ E 1737, [2-5].

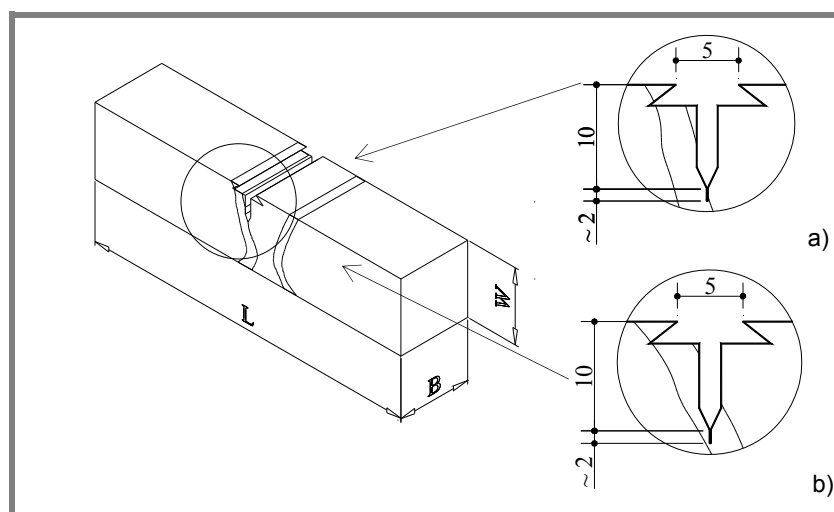
Tabela 1: Hemijski sastav čelika, (mas.%)

Table 1: Chemical composition of the steel, (mass.%)

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Ti %	Cr %	Al %	Cu %	Ni %	V %	Mo %	Nb %	Fe %
0.20	0.44	1.35	0.012	0.01	0.12	0.15	0.06	0.05	0.10	0.008	0.015	0.001	ost.



Slika 1: Oblik i dimenzije male SENB epruvete
Figure 1: Shape and dimension of the SENB sample



Slika 2: Standardni zavareni SENB uzorci:
a) prslina u grubožrnastom ZUT, b) prslina u finožrnastom ZUT
Figure 2: Standardized welded SENB samples
a) crack in the coarse grained HAZ, b) crack in the fine grained HAZ



REZULTATI I DISKUSIJA

Ispitivanje energije udara (žilavosti) simuliranih uzoraka

Ispitivanja su urađena na sledećim temperaturama: -40°C (samo OM), -20°C i +20 °C.

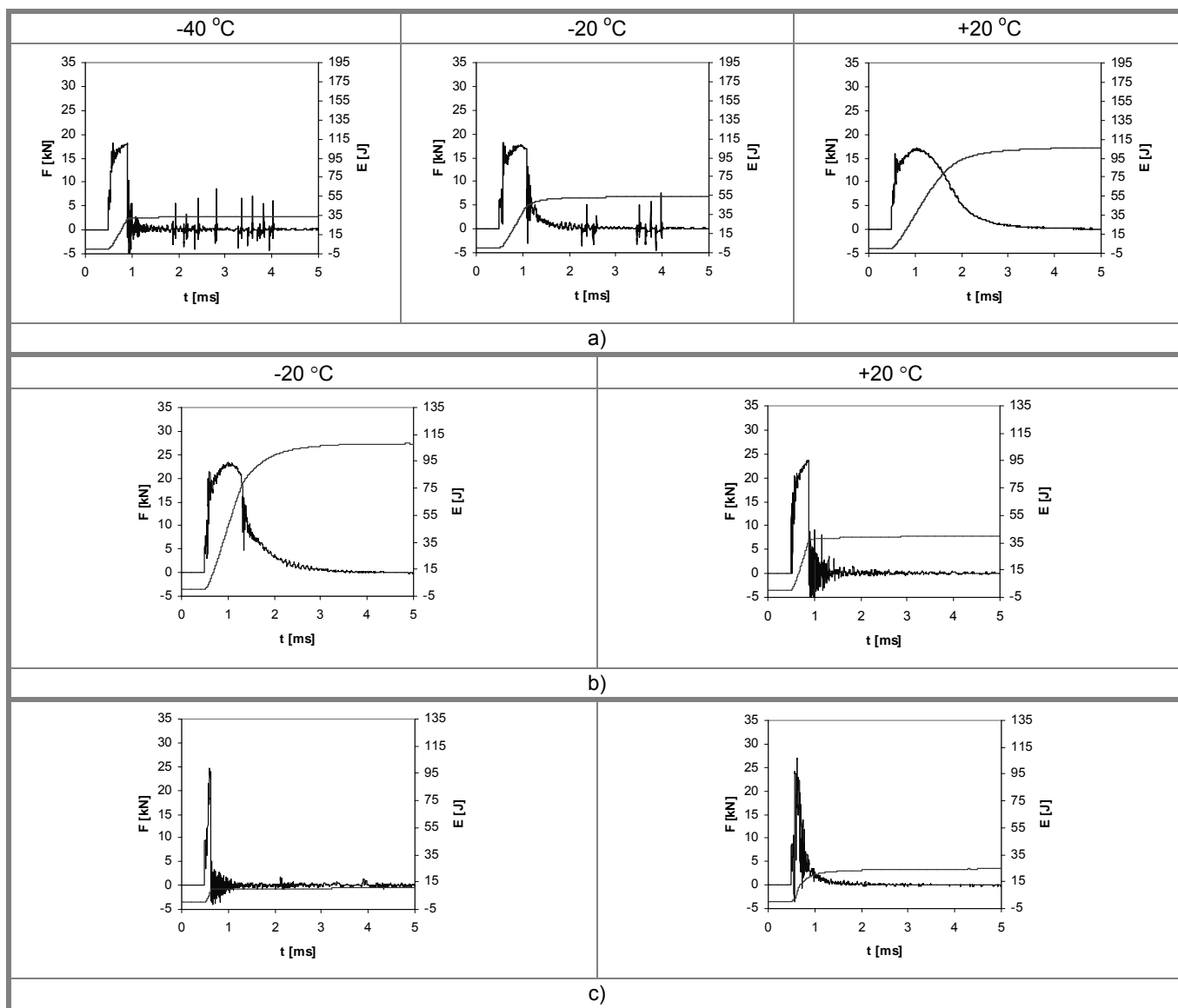
Osnovni metal, karakteriše se sa dobrom žilavošću, s obzirom na njegovu feritno-perlitnu strukturu, pri čemu na +20°C obe komponente ukupne energije su približno iste što ukazuje na visoku sposobnost za plastično deformisanje, ali istovremeno i na stabilan rast inicijalne prsline t.j. visoku otpornost ka nestabilnom lomu.

Sa sniženjem temperature očigledan je pad žilavosti, što je rezultat smanjene plastičnosti, ali još uvek su obe komponente slične veličine. Na -40°C, nestabilni lom se

dešava u istom momentu kad se inicira prslina, što je rezultat značajnijeg sniženja energije rasta prsline u odnosu na energiju za inicijaciju.

Dvociklusna finožrnasta struktura 1350/960°C poseduje zadovoljavajuću udarnu žilavost, što je logično zato što je to struktura kod koje se desila delimična ili potpuna normalizacija. Ipak, već pri -20°C energija za rast prsline je skoro nula i pored toga što je ukupna energija još na zadovoljavajućem nivou iznad 27 J, što znači da još ima sposobnosti da apsorbuje plastičnu deformaciju, no nakon inicijacije prsline nastupa krta lom.

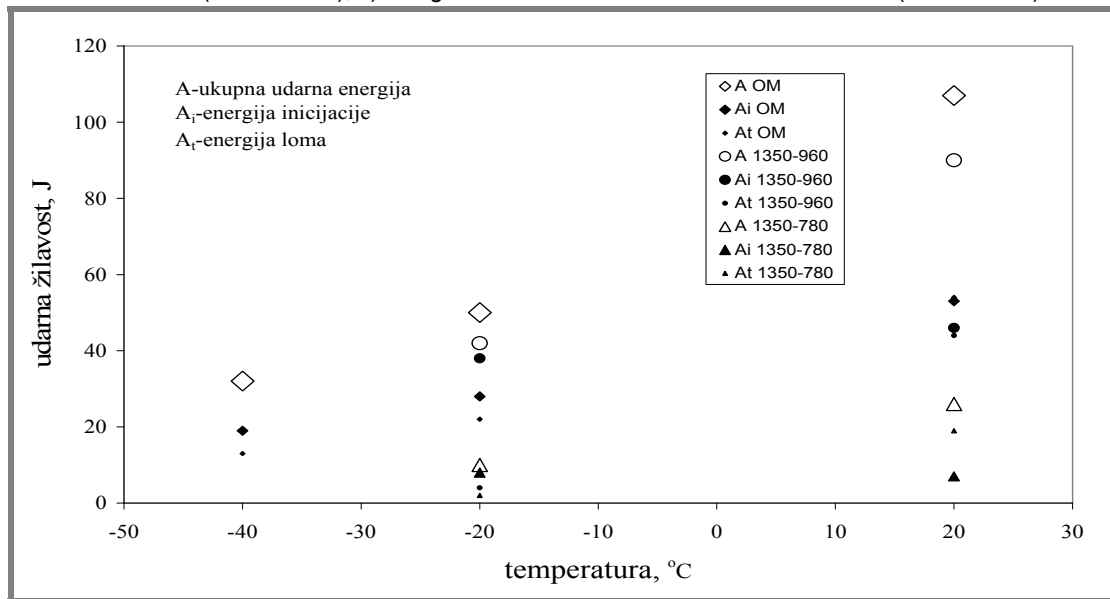
Kod dvociklusne 1350/780°C strukture za koju je karakteristično prisustvo, manje ili više, beinita pa čak i martenzita, udarna žilavost je veoma niska i pri +20°C, i skoro cela energija se troši na deformacioni rad t.j. energija rasta prsline je praktično nula.





Slika 3 : Dijagrami zavisnosti sila – vreme za energiju udara: a) Osnovni metal, b) Dvociklusna finostrukturna simulirana struktura (1350/960°C), c) Dvociklusna finostrukturna simulirana struktura (1350/780°C)

Figure 3: Diagrams of the force vs. time for the absorbed energy, a) base metal, b) fine grained simulated structure twice simulated (1350/960°C), c) fine grained simulated structure twice simulated (1350/780°C)



Slika 4: Raspedela energije udara za ispitane materijale

Figure 4: Distribution of the absorbed energy for tested materials

Ispitivanje žilavosti loma SENB uzoraka simuliranih mikrostruktura

Ispitani su uzorci osnovnog metala, kako i uzorci simuliranih mikrostruktura. Za svaku mikrostrukturu izrađeni su uzorci sa dva tipa prslina: zamorna prslina i prslina dobijena elektroerozijom, kako bi se dobila slika uticaja tipa prsline, s obzirom da kod zavarenih uzoraka prslina je bila izrađena i precizno locirana u ZUT elektroerozijom, a ipak u realnim zavarenim spojevima prslina su veoma oštre.

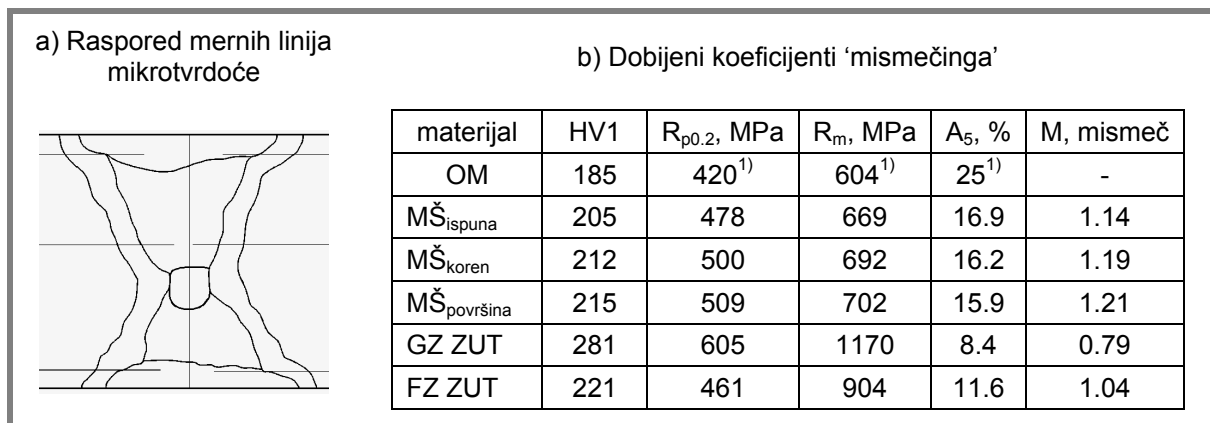
Kod svih epruveta od osnovnog metala je nastala inicijacija prsline t.j. njen stabilni rast, pri čemu kod epruveta sa erozivnom prslinom stabilni rast je

započeo pri relativno većoj vrednosti CTOD t.j. $\delta_{IC} \approx 0.57$ mm, dok kod epruveta sa zamornom prslinom stabilni rast je započeo još pri $\delta_{IC} \approx 0.31$ mm.

Ovo se može objasniti faktom da je veće zaobljenje u vrhu prsline omogućilo da se plastična deformacija proširi na veći volumen i s time da rastereti naponsko stanje u zoni oko vrha, dok je kod zamorne, deformacija bila koncentrisana oko malog volumena zbog čega je plastičnost u materijalu obuhvaćena tom deformacijom bila ranije iscrpljena i ranije je počeo rast prsline. To potvrđuje uticaj radijusa u vrhu prsline, i ako se uradi korelacija između zamorne i erozivne prsline, dobija se $\Delta \delta = \delta_{IC \text{ zamorna}} / \delta_{IC \text{ erozivna}} = 0.544$.

Tabela 2: Raspored mikrotvrdoće u zavarenom spoju

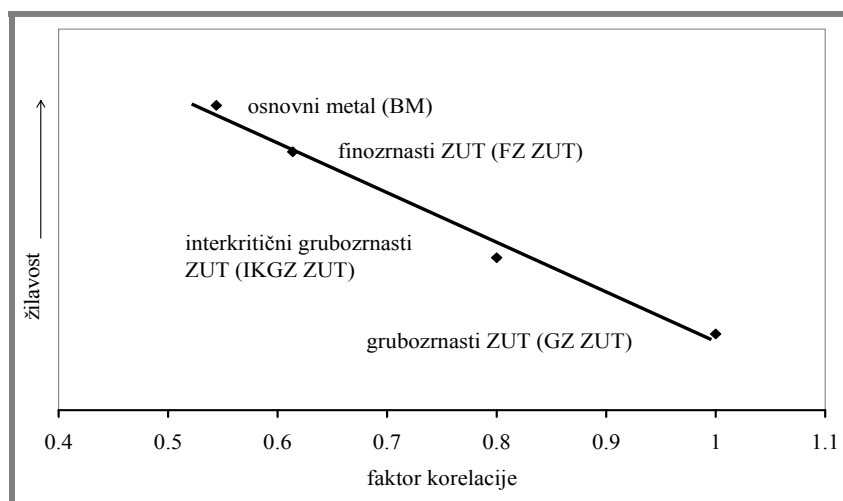
Table 2: Distribution of the micro hardness in welded joint





Kod epruvete za dvociklusnom finostrukturom 1350/960°C mogu da se iskoriste iste konstatacije, s time što su razlike u veličini CTOD pri inicijaciji stabilnog rasta δ_{lc} manje, a manje su i razlike u obliku krive. Kod ovih je za epruvete sa erozivnom prslinom $\delta_{lc} \approx 0.266$ mm, a kod epruvete sa zamornom prslinom $\delta_{lc} \approx 0.160$ mm, što daje faktor korelacije $\Delta\delta = 0.6$. Kod dvociklusne 1350/780°C grubozrnaste strukture nije konstatovan nikakav stabilan rast prsline,

što znači $\Delta a = 0$. Ipak, kod dvociklusne strukture 1350/780°C nestabilni rast se desio pri $\delta_c \approx 0.05$ mm za erozivnu prslinu, t.j. $\delta_c \approx 0.04$ mm za zamornu prslinu i ovde može da se definiše približni faktor korelacije $\Delta\delta = 0.8$. Ova razlika ukazuje da ipak, kod ove simulirane grubozrnaste strukture i pored toga što nema stabilnog rasta prsline, desilo se minimalno veće plastificiranje oko vrha erozivne prsline u odnosu na zamornu pre loma.



Slika 5: Odnos zamorne i erozivne prsline
Figure 5: Ratio between the fatigued and eroded cracks

Ispitivanje žilavosti loma zavarenih SENB uzoraka sa prslinom u ZUT

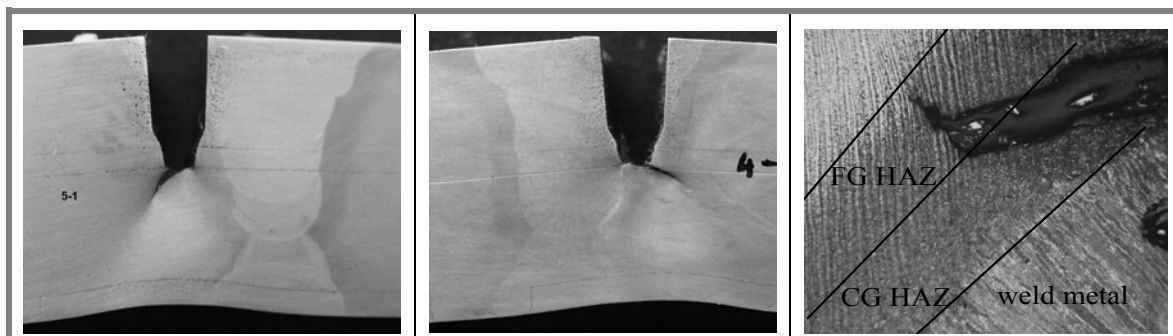
Uzorci osnovnog metala su pokazali slično ponašanje, s time što je priraštaj CTOD-a kod zamorne prsline veći u poređenju sa erozivnom prslinom [6], što se poklapa sa analizom i za simulirane uzorke. Kako i da je, nakon početka stabilnog rasta prsline uticaj vrha prsline nestaje i krive otpornosti za slučaj zamorne i erozivne prsline dobiju isti naklon [7].

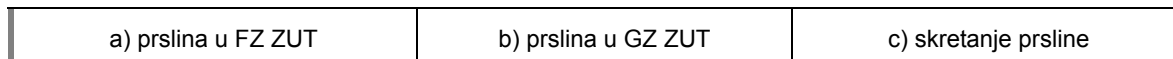
Vrednost CTOD-a na početku stabilnog rasta prsline, za slučaj erozivne prsline iznosi $\delta_{lc} = 0.544$ mm, i za zamornu prslinu $\delta_{lc} = 0.3$ mm. To daje vrednost faktora korelacije $\Delta\delta = 0.552$ što je skoro identično sa odnosom kod malih nestandardnih uzoraka što znači da i razlika veličine uzoraka u ovom slučaju ne utiče na lomno ponašanje.

U slučaju zavarenih uzoraka, važno je napomenuti da je propagacija prsline uvek išla prema osnovnom metalu, što znači da je prslina nakon početne inicijacije išla prema duktilnijem metalu, na taj način štiteći zavareni spoj od krtoq loma, slika 6.

Vrednost CTOD za početak stabilnog rasta prsline kod zavarenih uzoraka sa prslinom u finostrukturom ZUT iznosi $\delta_{lc} = 0.289$ mm, dok odgovarajući CTOD za slučaj sa prslinom u grubozrnastom ZUT iznosi $\delta_{lc} = 0.152$ mm.

Ako se uzme u obzir ranije definisan faktor korelacije, $\Delta\delta = 0.6$ za FZ ZUT tj. $\Delta\delta = 0.80$ za GZ ZUT, onda koregirane vrednosti za početak stabilnog rasta prsline iznose $\delta_{lc} = 0.173$ mm za FZ ZUT tj. $\delta_{lc} = 0.122$ mm za GZ ZUT.





Slika 6: Skretanje i propagacija prsline ka osnovnom metalu

Figure 6: Crack aberration and propagation to base metal

ZAKLJUČAK

Za čelik klase finostrukturnog mikrolegiranog čelika ČRN 420 korekcionni faktor ima vrednost 0.55 za osnovni duktilni materijal; 0.60 za dvociklusnu (1350/960°C) normalizovanu finostrukturnu strukturu; 0.8 za dvociklusnu (1350/780°C) međukritičnu grubostrukturnu strukturu i 1.0 za jednociklusnu (1350°C) grubostrukturnu strukturu. To uostalom znači da uticaj tipa prsline je veći što je veća duktilnost tj. žilavost ispitivanog materijala. Dobijena korelacija je veoma značajna za određivanje realne otpornosti loma zavarenog spoja sa prslinom u ZUT, zbog toga što je lociranje vrha prsline zamaranjem u specifičnom području ZUT-a, radi njegovih veoma malih dimenzija i volumena, kao i nepravilne geometrije, nepouzdan pristup i neophodna je izrada erozivne umesto standardne zamorne prsline.

U slučaju zavarenog spoja, mali 'overmeč' metala šava odigrao je zaštitnu ulogu na taj način što je sprečio rast prsline prema krtijim strukturama, GZ ZUT ili metal šava. U oba slučaja je prslina skrenula prema više duktilnijem osnovnom metalu i na taj način se brzina njenog rasta smanjila. Ono što je takođe važno spomenuti je razlika inicijacije stabilnog rasta prsline u slučaju kad je prslina locirana u dovoljno velikom volumenu jedne mikrostrukture i u slučaju kad je locirana u veoma uskom regionu kad dolazi do uticaja 'mismečinga'. U slučaju prsline u FZ ZUT, dolazi do pogoršanja žilavosti loma kad se radi o realnom zavarenom spoju u odnosu kad je prslina locirana u jednakoj simuliranoj mikrostrukтури. Ovo se može objasniti činjenicom da u zavarenom spoju, s jedne strane vrha prsline je osnovni duktilni metal, a s druge su jači GZ ZUT i metal šava sa smanjenom duktilnošću [8]. Ovi drugi sprečavaju slobodan razvoj deformacije i na taj način se oko vrha prsline povećava nivo napona koji dovede do ranije inicijacije prsline u poređenju sa

slučajem kad taj uticaj ne postoji tj. nema GZ ZUT-a niti metala šava. U slučaju prsline u GZ ZUT, dolazi do povećanja žilavosti loma kad se radi o realnom zavarenom spoju u odnosu na slučaj kad je prslina locirana u jednakoj simuliranoj mikrostrukтури. Ovo se može objasniti činjenicom da je sad prslina locirana u jačoj i manje duktilnijoj GZ ZUT, međutim ona je okružena slabijim i duktilnijim regionom metala šava, FZ ZUT-a i osnovnog metala, koji prihvataju deformaciju koja bi se razvila oko vrha prsline i na taj način resterećuju naponsko stanje oko vrha prsline. Ovo je povoljnije nego kad taj uticaj ne postoji tj. nema okolnih regiona, a to je kod simuliranih uzoraka.

LITERATURA

- [1] S. Ravi, V. Balasubramanian, S. N. Nasser, Effect of mis-match ratio (MMR) on fatigue crack growth behavior of HSLA steel welds, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, pp. 413-428, 2004.
- [2] ASTM E 1290-93: Standard test method for crack-tip opening displacement (CTOD) fracture toughness measurement, American Society for testing and Materials, Philadelphia, 1993.
- [3] ASTM E 1152-87: Standard test method for determining J-R curves, Philadelphia, 1987.
- [4] ASTM E 1820-99a: Standard test method for measurement of fracture toughness, Philadelphia, 1999.
- [5] ASTM E 1737-96: Standard test method for J-Integral characterization of fracture toughness, Philadelphia, 1996.
- [6] G. Adžiev, Uticaj mismečinga na integritet zavarene konstrukcije sa prslinom, doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Skoplju, 2003.
- [7] G. Adžiev, A. Sedmak, V. Gliha, T. Vuherer: "Uticaj tipa prsline na lomnu žilavost ZUT mikrolegiranog čelika", *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 2003, No. 4, pp. 191-196, Beograd.
- [8] G. Adžiev, A. Sedmak, T. Adžiev: "Numerical analysis of tensile specimen fracture with crack in HAZ", ECF16 "Structural Integrity Assessment in Theory and Practice", 2006, Alexandroupolis, Greece.